

補助事業番号 2019M-133

補助事業名 2019年度 空力騒音源の解明に向けた、理論・実験・解析の先進統合研究
補助事業

補助事業者名 呉工業高等専門学校 尾川 茂

1 研究の概要

自動車・新幹線・飛行機などの高速の乗り物や回転翼をもつ風車などには、縦渦が共通項として存在する。この縦渦による空力騒音の発生機構を解明し、抜本的な騒音低減策に繋がれば、共通の対策効果が期待できるため波及効果も大きい。本研究の目的は、縦渦による空力騒音の発生機構の解明である。しかし、微細な渦から放射される微弱な音波を捉えることは、難易度は高く未解明な点が多い。そこで、本研究を遂行するにあたり、先進性の高い理論・実験・解析の3つのツールを統合させる。以下に3領域の内容について説明する。まず①先進理論では、Lighthill-Curle方程式から空力騒音を理論的に予測する。実測値と比較しながら理論の妥当性を検証する。その予測値と実験値や解析値と比較し、その妥当性を確認して騒音の発生機構を理論的に解明する。さらに、②先進実験では、大型三角翼で縦渦を再現し、ビームフォーミング法によって、縦渦の音源分布解明に着手する。翼表面に超小型マイクを埋め込み遠距離場音との相関を求め、翼表面の圧力変動が音源となっているかを見極める。③先進解析では、本校の学術提携校である兵庫県立大学のスパコンを利用する。解析では流体のNavier-Stokes方程式を非定常で解析し、微細な渦運動が音波を発生している様子を可視化する。特に、音源と考えられる縦渦先端については、スパコンの許容限界まで空間的・時間的な分解能を高め、渦の強い非定常運動が大きな空力騒音を励起している状況を可視化する。以上述べた先進的な理論・実験・解析を統合し、縦渦による音の発生機構を解明する。

2 研究の目的と背景

(1) 目的

本研究の目的は、縦渦による空力騒音の発生機構を解明することである。空力騒音の発生機構の解明とは、縦渦の部位と騒音の関係、並びに渦からの音の生成過程を解明することである。すなわち、渦による音波の発生現象の解明である。非定常性の強い、微細な渦構造を捉え、その非定常運動から音波を発生している様子を捉えることである。

(2) 背景

近年、人々の生活水準の向上に伴い、騒音低減が社会的課題となっている。すなわち、自動車・新幹線・飛行機などの高速走行の乗り物や、再生エネルギーの風車などの回転翼を有する構造物では、空力騒音(風切り音)が風速の6~8乗に比例して増大するため、その低減の社会的ニーズは極めて大きい。騒音の音源は渦、その中でも流れ方向に平行な回転軸を有する縦渦が主音源となっている。したがって、縦渦による空力騒音に着目し、その発生機構を解明し低減につなげることは社会的に意義がある。

3 研究内容

縦渦による騒音発生機構の解明を理論・実験・解析の3領域から解明した。

(1)理論

音源項を翼表面の圧力変動の時間微分とするLighthill-Curle方程式を用いて遠距離場音を解析で予測し、実験値と200 Hz～1 kHz 以下の周波数帯で比較的良く一致することが確認できた。このことから音源は物体表面の圧力変動の時間変動に起因していることが分かった。

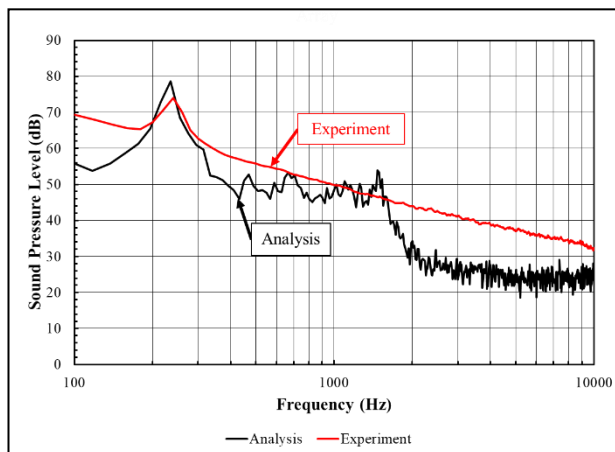


図 1. Lighthill-Curle の式による解析予測（黒線）と実験値（赤線）の比較

(2)実験による縦渦の音源分布解明

宇宙航空研究開発機構JAXAの低速度風洞を使用し大型三角翼で縦渦を再現し、多数のマイクから構成されるマイクロホン

アレイを使用したビームフォーミング法によって、縦渦の音源分布を観察した。使用した三角翼は幅・長さが共に0.8 mで、頂角は60°、90°、120°の三仕様である。その音源分布を図2に示す。頂角が60°、90°では縦渦の先端に赤色の強い音源が見られるが、頂角が120°の鈍角になると縦渦は崩壊し、先端から後端に音源が移動している。

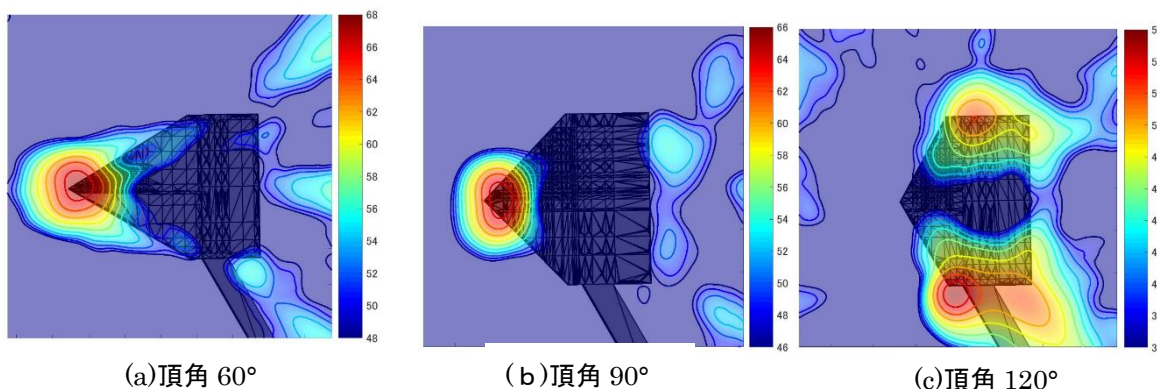


図 2. JAXA 風洞実験におけるビームフォーミング法によって計測された周波数 2.5 kHz の縦渦の音源分布（赤色が強い音源を示す）。

【JAXAでの風洞実験の様子】 https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2019/09/27_1.html

【学会での発表の様子】 <https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2019/11/08.html>

(3)スパコン解析による空力騒音の発生機構

スパコンによって三角翼の前縁で形成される縦渦の速度流線を図3に示す。鋭角の三角翼では強い縦渦が形成されるが、頂角が大きくなるにつれて縦渦は弱くなり、頂角120°では縦渦は崩壊し

ていることが分かる。また、渦度分布を図4に示す。縦渦は無数の渦から構成されている。渦音理論から渦の非定常な動きが大きな音を放射することが推察される。図5に縦渦先端から後方に向けて各断面での渦度の強さとその非定常性の変化を示す。縦渦の先端近傍のAとB断面では強い渦度と非定常性が大きい、後方のC、Dでは対流と粘性によって渦の強さと非定常性も減衰し、空力騒音の発生は小さくなっていると考えられる。この解析結果は、図2の実験で得られた音源分布と一致するものである。縦渦先端の強い渦の非定常性の激しい運動が大きな空力騒音を励起しているものと考えられる。Lighthill-Curleの理論式から音源は物体表面の圧力変動の時間微分、すなわち強い渦の非定常運動が音源となっていることを裏付けるものである。

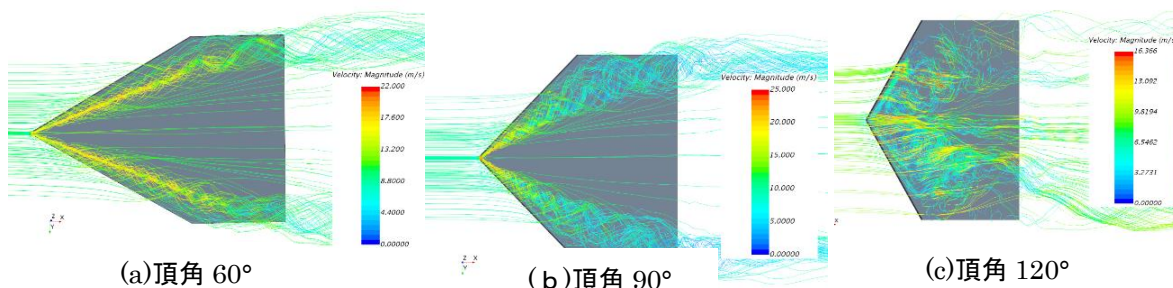


図 3. 速度流線の比較。頂角が鋭角であるほど強い縦渦が発生。一様流（緑色）は 10m/s で翼先端部ではその 2~3 倍程に増速（オレンジ色）している。

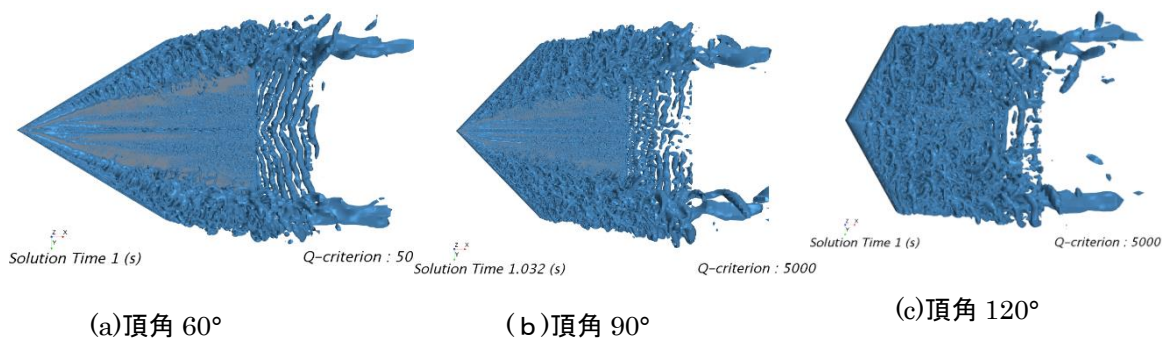


図 4. 渦度分布（Q 値 5000 の等値面）。縦渦は無数の小さな渦の集合体であることがわかる。

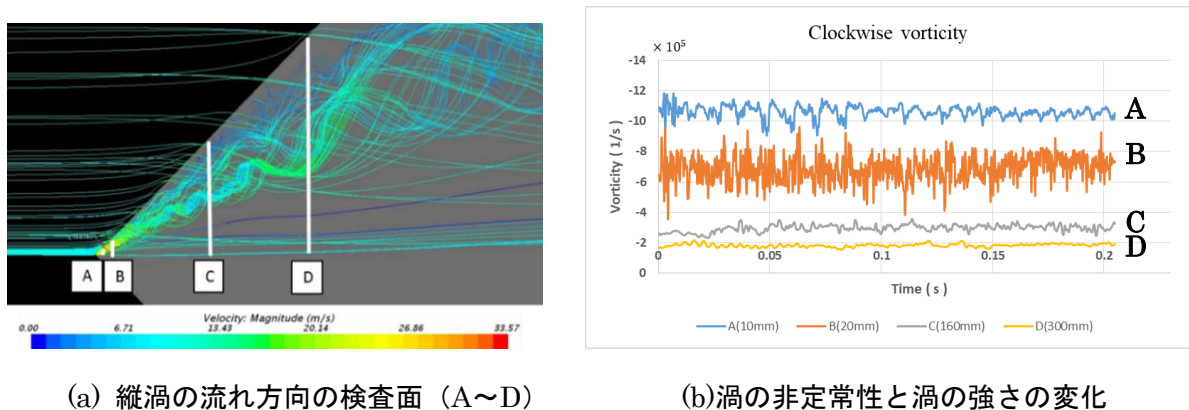


図5. 縦渦の流れ方向における検査断面と、各断面における渦の非定常性と渦の強さの変化

4 本研究が実社会にどう活かされるか一展望

本研究では、風洞試験で整流された乱れの小さい一様な流れの中に置かれた物体周りに形成される縦渦の空力騒音の発生機構が明らかにできたが、この研究はリアルワールドを考慮した自動車の空力騒音評価に関する風洞実験並びに実走評価を新しく見直す契機になるものと考えられる。すなわち、風洞実験と実走評価では車内で聞こえる空力騒音の音質が異なり、実走評価の方が耳障りな変動感を伴う音が大きくなるという問題がある。いわゆるバサバサ音と呼ばれる、変動感を伴う数Hzの低い周期の空力騒音が乗員の快適性を損なっている。乱れの小さい一様流による風洞試験ではこの音は評価できず、バサバサ音の発生要因は未解明の状況である。

今回の研究で得られた知見から、乱れの大きな自然風が空力騒音の主音源である縦渦と干渉することで、低周波数の周期的な変動音を励起するものと推察される。自動車分野に関わらず、風車・ファンなどのターボ機械、航空機・ドローンのなどの航空分野においても、自然風を考慮した流体騒音低減研究に対する新たな発展につながるものと期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

自動車業界で10年間空力騒音研究の実務経験を積み、そこで得られた知見をまとめ「縦渦による剥離・再付着を伴う物体の空力騒音に関する研究」で東京大学から博士号を取得した経緯がある。

今回の研究によって、従来の研究では分からなかった縦渦の音源分布と発生機構が、実験と解析の両方面で高い精度で解明でき、今後の応用研究への礎とすることができた。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等【研究業績ポータルresearchmap】<https://researchmap.jp/ogawa-sh>

(1) 国際会議発表

- ①Naoki Hata, Shigeru Ogawa, Takahiro Nomura, Optimization of Circular Cylinder Blades Length against Scale Change of Horizontal Wind Turbine with Circular Cylinder Blades Driven by Longitudinal Vortex, Paper # E414, (N0. 19-206) Proceedings of the International Workshop on Environmental Engineering (IWEE), pp.195-196, 2019.
- ②Shigeru Ogawa, Kota Samura, Hiroki Okada, Kohei Suzuki, Harutaka Honda, Numerical Analysis on Aerodynamic Noise Sources of Longitudinal Vortex, Paper # E114, (N0. 19-206) Proceedings of the international Workshop on Environmental Engineering IWEE, pp.40-41, 2019.
- ③Shigeru Ogawa, Hiroki Ura, Takehisa Takaishi, Hiroki Okada, Kota Samura, Harutaka Honda, and Kohei Suzuki, Aerodynamic Sound Identification of Longitudinal Vortex System, FSSIC Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, 2019.
- ④Shigeru Ogawa, Hiroki Ura, Takehisa Takaishi, Hiroki Okada, Kota Samura, Harutaka Honda,

and Kohei Suzuki, Generation Mechanism of Aerodynamic Noise Radiated from Longitudinal Vortex, The 30th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP30), 2019.

(2) 国内学会発表

- ①尾川 茂, 岡田大輝, 佐村昂太, 本田陽敬, 鈴木康平: 縦渦から放射される空力騒音の発生機構に関する研究, 日本機械学会2019年度年次大会 講演論文集 No. J09108, 2019.
- ②尾川 茂, 鈴木康平, 岡田大輝, 佐村昂太, 本多陽敬: 縦渦の騒音源に関する研究, 日本流体力学会年会2019.
- ③岡田大輝, 本田陽敬, 尾川 茂: 縦渦の空力騒音の音源探査と発生機構に関する実験的研究, 日本機械学会 第97期 流体力学部門 講演会, No. 0S5-04, 2019.
- ④佐村昂太, 鈴木康平, 尾川 茂: 縦渦から放射される空力騒音の発生機構の数値解析, 日本機械学会 第97期 流体力学部門 講演会, No. 0S5-02, 2019.
- ⑤秦 直輝, 尾川 茂, 野村高広: 水平軸式縦渦風車の翼形状の検討, 日本機械学会 第97期 流体力学部門 講演会, No. 0S4-23, 2019.
- ⑥木村優介, 尾川 茂: 垂直軸式マグナス風車における円筒翼装置の研究, 日本機械学会 第97期 流体力学部門 講演会, 0S4-01, 2019.
- ⑦尾川 茂, 浦 弘樹, 高石 武久, 岡田大輝, 佐村昂太, 本田陽敬, 鈴木康平: 三角翼の頂変化が縦渦の音源と渦構造に及ぼす影響, 第39回流力騒音シンポジウム発表, 2019.
- ⑧岡田大輝, 尾川 茂, 浦 弘樹, 高石武久, 佐村昂太, 鈴木康平, 本多陽敬: デルタ翼の先端角が空力騒音源に及ぼす影響評価, 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会, Paper No.05c6, 2020.
- ⑨佐村昂太, 尾川 茂, 鈴木康平, 本多陽敬, 岡田大輝: 数値解析によるデルタ翼の先端角が空力騒音源に及ぼす影響評価, 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会, Paper No.05a2, 2020.
- ⑩秦 直輝, 尾川 茂, 野村高広: 水平軸式縦渦風車の翼形状の検討, 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会, Paper No.05b2, 2020.
- ⑪木村優介, 尾川 茂: 垂直軸式風車におけるターボセイル技術を応用した円筒翼装置の研究, 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会, Paper No.05c1, 2020.
- ⑫本多陽敬, 尾川 茂, 浦 弘樹, 高石武久, 岡田大輝, 鈴木康平: 縦渦先端の音源に関する実験的研究, 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会, Paper No.05a1, 2020.
- ⑬鈴木康平, 尾川 茂, 佐村昂太, 岡田大輝, 本多陽敬: 縦渦による空力騒音源に関する研究, 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会, Paper No.05b1, 2020.

- ⑭佐藤 尊, 尾川 茂:六角柱端で発生する縦渦の特性に関する研究, 日本機械学会 中国四国学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会, Paper No.05a4, 2020.
- ⑮今田 淳, 尾川 茂:風レンズと縦渦風車を融合したハイブリット型風車の研究, 日本機械学会 中国四国学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会, Paper No.05a5, 2020.
- ⑯川野 啓, 尾川 茂:数値解析による音響モデルと実車モデルの縦渦の特性比較, 日本機械学会 中国四国学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会, Paper No.05b1, 2020.

(3) 研究報告書(呉工業高等専門学校) 2020年3月出版

【機械工学科卒業研究論文集】

- ①佐藤 尊:六角柱端で発生する縦渦の特性に関する研究
- ②川野 啓:数値解析による音響モデルと実車モデルの縦渦の特性比較
- ③今田 淳:風レンズと縦渦風車を融合したハイブリット型風車の研究

【専攻科応用研究論文集】

- ①鈴木 康平:縦渦による空力騒音源に関する研究
- ②本多 陽敬:デルタ翼から放射される空力騒音の実験的研究

【専攻科特別研究論文集】

- ①岡田 大輝:デルタ翼の先端角が空力騒音源に及ぼす実験的影響評価
- ②佐村 昂太:数値解析によるデルタ翼の先端角が空力騒音源に及ぼす影響評価
- ③秦 直輝:水平軸式縦渦風車に関する研究
- ④木村優介:垂直軸式風車におけるターボセイル技術を応用した円筒翼装置の研究

7 補助事業に係る成果物

該当はありません。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 呉工業高等専門学校 (クレコウギョウコウトウセンモンガッコウ)

住 所: 〒737-8506

広島県呉市阿賀南2-2-11

担 当 者: 嘱託教授 尾川 茂 (オガワ シゲル)

担 当 部 署: 機械工学分野 (キカイコウガクブンヤ)

E - m a i l: ogawa@kure-nct.ac.jp

U R L: <https://www.kure-nct.ac.jp/> (呉高専TOPページ)

→<https://www.kure-nct.ac.jp/campuslife/diarybox.html> (呉高専日誌)

→https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2019/09/27_1.html (事業紹介1)

<https://www.kure-nct.ac.jp/newdiary/2019/11/08.html> (事業紹介2)